0254-6124/2015/35(5)-566–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhang Tiemin, Wang Jihong, Liu Hanjun. Observation of sporadic sodium layer over Haikou of China in 2010 (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(5): 566-573, doi:10.11728/cjss2015.05.566

2010 年海口上空突发钠层事件观测*

张铁民[1] 王继红[2] 刘汉军[1]

1(海南师范大学物理与电子工程学院 海口 571158)

2(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 使用钠荧光激光雷达观测 2010 年低纬度地区海口 (20.0°N, 110.3°E) 上空突发钠层事件. 2010 年总计观测时间为 458 h, 观测到突发钠层事件 38 次, 即每观测 12 h 有 1 次突发钠层事件发生. 结合武汉上空突发钠层数据, 对比巴西低纬度地区数据, 揭示低纬度地区突发钠层频发现象. 观测到 2010 年 12 月 30 日突发钠层峰值时刻钠层密度廓线具有很好的空间对称性. 分析了距海口激光雷达西南约 160 km 中国海南澹州 (19.5°N, 109.1°E) 的测高仪数据, 检测了 13 对突发钠层和电离层偶发事件, 结果表明突发钠层与 Es 有很强的相关性. 通过分析低纬度地区上空突发钠层峰值径迹平均速度发现, 大多数突发钠层峰值向下运动.

关键词 激光雷达, 突发钠层, 电离层偶发, 低纬度地区

中图分类号 P 352

chinaXiv:201605.01655v1

Observation of Sporadic Sodium Layer over Haikou of China in 2010

ZHANG Tiemin[1] WANG Jihong[2] LIU Hanjun[1]

1(*College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou* 571158)

2(*State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Sodium lidar observations of Sporadic Sodium Layers (SSL) in 2010 at a low-latitude location (Haikou, China, 20.0°N, 110.3°E) are reported in this paper. The wavelength of the dye laser is set to 589 nm by a sodium fluorescence cell. The energy and divergence of the beam are about 45 mJ and 1 mrad, respectively. The repetition rate of Nd:YAG laser is 30 Hz. The backscattered fluorescence photons from the sodium layer are collected by a telescope with a 1000 mm diameter primary mirror. From 38 SSLs events detected in about 458 h of observation, an SSL occurrence rate of 1 event every 12 h at our location was obtained. This result, combined with previous studies at a mid-latitude location (Wuhan, China, 31°N, 114°E), and compared with the SSLs at a low-latitude location (Brazil, 23°S, 46°W), reveals that the SSL occurrence can be frequent at a low-latitude location of Haikou, China. The profiles of a peak density of the SSL were very spatial symmetry

* 国家自然科学基金项目 (41364005) 和空间天气学国家重点实验室专项基金资助项目 (Y02211J82S) 共同资助

2014-09-26 收到原稿, 2015-03-21 收到修定稿

E-mail: liuhanjun76@163.com; zhangtiemin@sohu.com

on Dec. 30, 2010. With respect to the correlation with sporadic E, the ionosphere data obtained by an ionosonde operated at Danzhou, China (19.5°N, 109.1°E), about 160 km southwest of Haikou lidar station, have been examined. By statistical analysis of 13 events, when simultaneous SSL data and ionograms are available, a considerable correlation was found between sporadic E layers and the SSLs. The sporadic sodium layers have average downward vertical velocities at Haikou, China.

Key words Lidar, Sporadic sodium layer, Sporadic E layer, Low latitude

0 引言

中高层大气既是火箭和导弹的通过区及航天器的再入区, 同时也是高频及卫星通信电波的通过区或反射区, 因此对这一区域的探测与研究受到广泛关注. 钠层处于高度为 80~110 km 范围的大气层, 其与其他原子、分子、离子具有各种复杂的物理、化学和动力学相互作用. 由于钠层原子与其同高度的中高层大气及低电离层成分的紧密耦合, 使得利用钠层原子的示踪作用, 通过钠荧光激光雷达对中高层大气及低电离层进行观测研究成为可能, 从而为大气中间层顶区域及电离层 D 区和 E 区的探测提供了一条有效途径.

钠荧光激光雷达为系统研究钠层提供了一种有效工具 [1], 多年来使用钠荧光激光雷达对钠层的探测分析已取得了很多成果 [2−5]. 突发钠层是一类常见的钠层暂态特征, 其形成和发展直接与钠层的源和汇相联系 [6−10]. 由于中国低纬度激光雷达观测工作开展时间不长, 尚未有低纬度突发钠层的研究报导. 本文利用位于中国海口 (20.0°N, 110.3°E) 的钠荧光激光雷达 2010 年度对钠层的观测数据, 统计分析了低纬度地区突发钠层特征, 进而根据附近电离层观测站的电离层垂直数据分析了突发钠层与偶发 E 层之间的相关性.

1 设备

位于中国海口市 (20.0°N, 110.3°E) 的激光雷达系统, 作为中国子午工程的一个重要站点, 是中国唯一的低纬度激光雷达观测站. 此激光雷达观测站主要目标是探测低纬度地区中间层顶钠层特性, 进而分析低纬度中间层顶区域大气温度、密度、风场等情况. 观测站钠激光雷达系统利用 Nd:YAG 激光器作为发射激光器. 其发射的波长 1024 nm 的激光束, 经晶体倍频到波长 532 nm, 再经泵浦可调谐的染料激光器产生 589 nm 光束, 最后通过钠荧光室形成共振荧光探测光束. 激光器设定重复率为 30 Hz, 脉冲能量为 42 mJ, 光束发散角为 1 mrad. 激光雷达接收望远镜主镜直径为 1000 mm, 视场角为 2 mrad, 雷达的发射光束距离接收望远镜中心 6 m. 钠层后向散射荧光光子经望远镜接收后, 通过带宽为 1 nm 的带通光学滤光片, 经光电倍增管和前置放大器信号放大后, 被光子计数器采集, 累积 5000 个激光脉冲 (时长 2.78 min), 形成高度分辨率为 100 m 一个的雷达回波剖面数据. 钠层的廓线由激光雷达回波光子计数标准转化程序得到. 钠荧光激光雷达参数列于表 1.

2 观测

2010 年观测站累计有效观测 (超过 3 h) 73 个夜间, 共计 458 h 观测数据. 突发钠层判断标准为突发钠层最大峰值密度高于同一高度平均钠层密度 2 倍. 根据这一标准, 表 2 列出了 2010 年统计出的 38 次突发钠层事件, 发生频率为每次 12 h, 中国中纬度地区 (武汉, 31°N, 114°E) 激光雷达观测的突发钠层发

表 1 海口地区钠荧光激光雷达参数

Table 1 Specifications of the sodium lidar in Haikou

波长	589 nm
脉冲能量	42 mJ
重复率	30 Hz
发散角	1 mrad
接收系统望远镜口径	1000 mm
视场角	2 mrad
光学带宽	1 nm
光子数据空间分辨率	100 m

生率为每次 9 h[11]. 观测发现突发钠层持续时间最短为 25 min, 持续时间最长为 368 min. 2010 年低纬度地区海口上空突发钠层峰值半高全宽最大值为 3.5 km, 最小值为 0.7 km, 突发钠层峰值高度最低为 89.4 km, 最高为 105.6 km. 突发钠层峰值密度最强为 16 948 cm^{-3}.

图 1(a)~(d) 为 2010 年海口上空突发钠层事件统计参数. 从图 1(a) 可知, 突发钠层峰值高度主要分布在 89~101 km, 但在 103 km 和 105 km 也观测到突发钠层事件. 大多数突发钠层峰值高度发生在 92~95 km 范围内, 占全年发生率的 47.3%, 突发钠层峰值高度平均值为 95.7 km. 图 1(b) 给出的是

表 2 2010 年 38 个突发钠层事件的主要参数

Table 2 Main parameters of 38 pairs of SSL in 2010

日期 (月–日)	峰值时刻 (LT)	增长时间 /min	衰减时间 /min	峰值密度 /cm^{-3}	峰值高度 /km	半峰全宽 /km	强度因子
May 4	23:55	14	9	1626	99.5	1.5	3.0
May 6	00:23	50	41	1391	96.5	1.9	7.0
May 18	01:10	17	136	12 487	97.1	2.9	3.0
May 18	22:55	83	> 156	16 948	95.4	1.7	8.0
Jun. 20	03:47	83	> 72	7975	94.2	2.8	4.0
Jul. 1	04:24	64	> 41	2561	92.7	3.5	4.0
Jul. 1	21:09	> 8	125	4578	97.2	1.5	4.0
Jul. 3	03:10	28	117	3633	100.7	1.9	2.5
Jul. 3	23:01	> 103	113	13 751	89.4	1.5	4.5
Jul. 5	22:29	> 109	106	5062	94.6	2.2	3.5
Jul. 6	22:12	> 39	156	11 935	94.7	1.2	8.0
Jul. 7	21:04	未知	59	12 729	94.7	1.3	6.5
Jul. 8	22:33	53	273	3754	100.9	0.7	7.0
Jul. 14	23:01	50	119	1499	100.7	1.4	5.0
Aug. 11	00:20	> 39	108	13 877	90.4	2.8	2.0
Aug. 30	23:33	> 37	64	2737	100.6	2.1	6.5
Sept. 17	00:45	58	128	270	101.5	1.8	2.5
Sept. 18	01:04	64	120	1690	95.6	2.0	2.0
Sept. 19	00:23	100	260	5687	92.3	3.3	6.0
Sept. 19	23:29	34	147	5479	92.0	1.9	4.5
Oct. 23	23:42	69	115	3566	94.4	2.8	2.5
Oct. 25	02:34	67	186	5644	95.1	1.2	3.5
Oct. 31	01:38	165	203	5079	91.3	2.5	5.0
Nov. 1	04:53	111	> 23	4606	92.6	1.5	4.0
Nov. 2	01:24	64	142	8759	93.0	1.7	6.5
Nov. 3	00:28	31	103	85	103.4	0.8	6.0
Nov. 9	03:10	67	> 130	7120	92.9	1.4	6.0
Nov. 19	23:40	> 206	102	7840	90.0	2.0	4.0
Dec. 2	01:29	130	84	5759	91.8	2.9	5.0
Dec. 2	21:31	39	223	10 019	94.7	1.8	8.5

表 2 续

Table 2 continued

日期 (月–日)	峰值时刻 (LT)	增长时间 /min	衰减时间 /min	峰值密度 /cm^{-3}	峰值高度 /km	半峰全宽 /km	强度因子
Dec. 4	03:32	98	> 89	3980	91.7	2.0	3.5
Dec. 10	20:15	17	16	632	99.5	0.8	3.5
Dec. 12	21:24	103	120	5929	98.4	2.8	5.0
Dec. 23	21:03	39	41	6316	93.5	1.6	3.5
Dec. 26	20:48	17	61	922	105.6	1.5	3.5
Dec. 27	20:27	> 11	153	4856	101.1	1.9	9.5
Dec. 29	02:02	75	86	3532	98.2	2.1	2.5
Dec. 30	23:16	17	103	6362	95.6	1.1	4.0

注 “>”表示在大于这个时间内没有观测到突发钠层开始或结束, 增长时间为从突发钠层开始时刻到峰值时刻经历的时间, 衰减时间为从突发钠层峰值时刻到消失经历的时间, 强度因子为突发钠层峰值密度与突发前同一高度处钠层密度的比值.

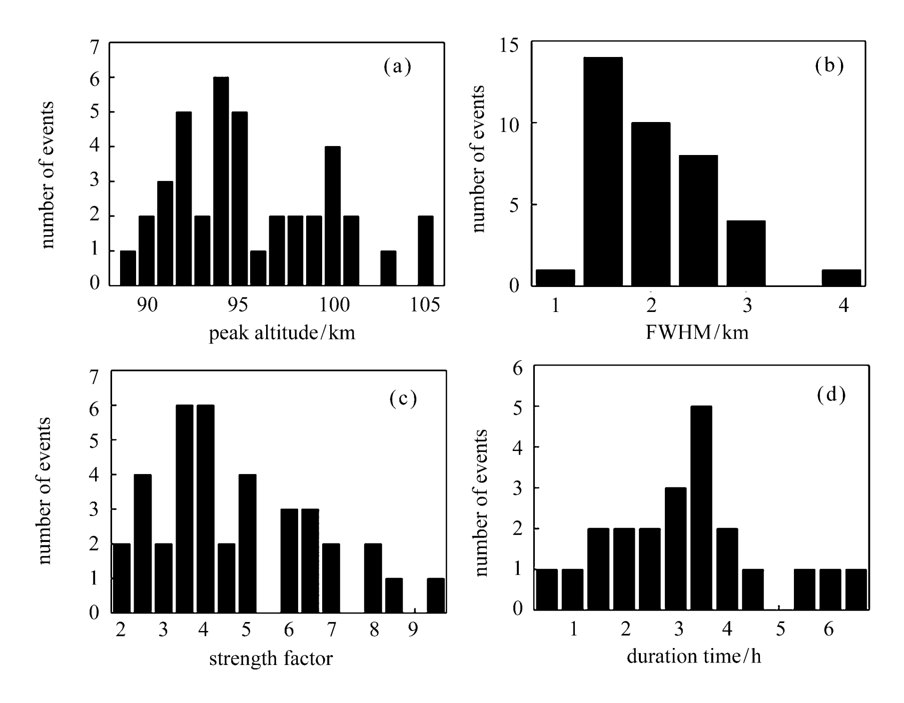


图 1 2010 年海口上空突发钠层事件统计参数

Fig. 1 Main parameters of sporadic sodium layers

突发钠层半峰全宽统计, 可以看出突发钠层宽度主要集中在 1.0~3.0 km 范围内, 这个宽度范围突发钠层发生率为 94.7%, 突发钠层宽度平均值为 1.98 km. 对比 Batista 等 [7] 在巴西低纬度地区 (23°S, 46°W) 观测的突发钠层事件, 突发钠层峰值高度平均值为 95.0 km, 突发钠层宽度平均值为 2.0 km. 中国中纬度地区 [11] (武汉, 31°N, 114°E), 突发钠层宽度平均值也为 2.0 km. 强度因子统计如图 1(c) 所示, 可以看出强度因子主要介于 2.5~6.5 之间. 由于观测时受天气因素影响, 只有 22 次突发事件观测到完整的过程. 这些突发钠层持续时间相差很大, 在 0.5~6.5 h 之间都有观测. 从全年统计来看, 突发钠层持续时间主要集中在 1.5~4.0 h 范围内.

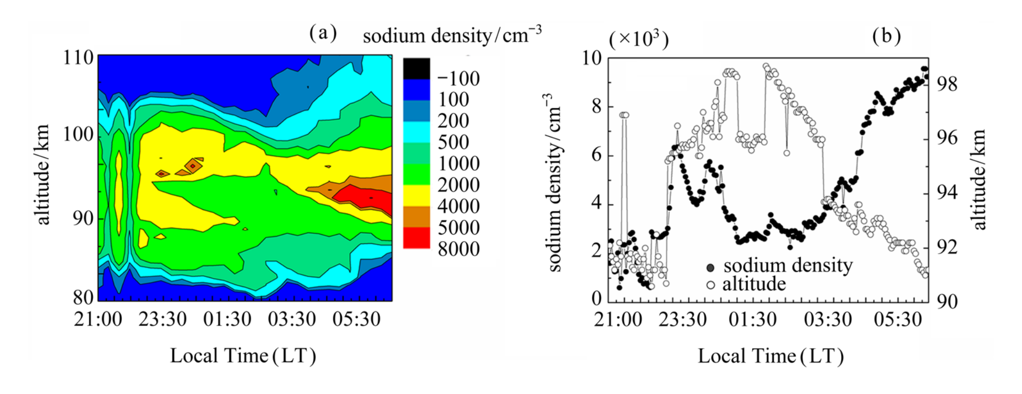


图 2 发生在 2010 年 12 月 30 日夜间的突发钠层典型事件. (a) 钠层密度廓线, (b) 钠层密度和峰值变化

Fig. 2 Sodium sporadic event observed on Dec. 30, 2010. (a) sodium density profiles, (b) sodium density and sporadic peak variation

3 讨论

为研究低纬度地区中高层大气钠层突发特性, 对海口上空突发钠层典型事件进行了分析, 图 2 给出的是 2010 年 12 月 30 日夜间海口钠荧光激光雷达观测到的典型突发钠层事件. 图 2(a) 所示为 21:30 LT 至次日 06:30 LT 激光雷达的观测数据, 观测持续时间为 9 h, 钠层存在空间高度范围为 80~110 km. 在 23:15 LT 左右有一个明显的局地钠层密度突然增强区域, 持续大约 120 min, 次日早晨 05:00 LT−06:30 LT 钠层密度很大. 在这个观测夜晚, 钠层密度峰值高度先是从低空向高空发展, 然后又从高空降落回低空. 图 2(b) 为钠层密度峰值高度和峰值密度演化过程. 从 21:30 LT, 高度 91.2 km, 到次日凌晨 02:15 LT, 高度达到最高的 97.9 km, 在早晨 06:15 LT, 高度又回到 91.4 km. 钠层密度在夜间 21:30 LT 时为 1261 cm^{-3}, 22:00 LT 增加到 2579 cm^{-3}, 而后钠层密度减小, 在 22:30 LT 达到观测的最小值 620 cm^{-3}, 此后钠层密度再次增加, 从 22:59 LT 开始, 发生明显的突发钠层, 突发峰值高度为 95.2 km, 钠层密度为 3035 cm^{-3}. 钠层密度增长非常快, 经过 17 min, 即 23:16 LT, 钠层密度达到 6362 cm^{-3}. 随后钠层密度逐渐减小, 经过 103 min, 突发钠层消失, 突发钠层持续时间共计 120 min. 从次日凌晨 01:00 LT 开始至 03:00 LT 钠层密度在 2500~3000 cm^{-3} 范围内, 此后钠层峰值密度不断增加, 到 06:30 LT 达到观测最大值 9235 cm^{-3}.

分析突发钠层峰值时刻特性, 图 3 给出了 2010 年 12 月 30 日夜间突发钠层峰值时刻钠层密度廓线. 结果显示在 23:16 LT 这个突发钠层高度为 95.6 km, 钠层密度达到 6362 cm^{-3}. 钠层峰值宽度取半峰全宽 1.1 km. 由图 3 可以看到, 在突发钠层的两侧, 在 100.1 km 和 90.0 km 高度分别明显出现两个突发钠层峰值, 密度分别为 3032 cm^{-3} 和 2946 cm^{-3}. 同时, 距突发钠层峰值两侧更远处还有不太明显的两个峰, 高度在 101.8 km 和 87.7 km, 密度为 1960 cm^{-3} 和 2093 cm^{-3}, 显示出突发钠层这个时刻的钠层密度廓线具有很好的空间对称性.

对于突发钠层产生机制, Clemesha 等 [12] 认为流星烧蚀产生了突发钠层. 目前理论研究认为突发钠层产生与电离层偶发 E (Sporadic E, Es) 层有密切关联 [13], Es 是指出现在电离层 E 区高度附近不同

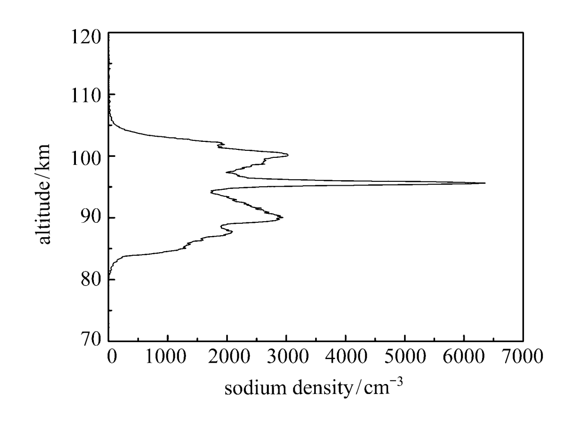


图 3 发生在 2010 年 12 月 30 日 23:16 LT 的突发钠层密度廓线

Fig. 3 An SSL event observed in Haikou of China at 23:16 LT on Dec. 30, 2010

于正规 E 层的等离子不规则体. 为了分析海口上空突发钠层与偶发 E 层之间的关联, 对比附近测高仪数据, 测高仪观测地点为中国海南澹州 (19.5°N, 109.1°E), 位于海口激光雷达西南方向约 160 km, 测高仪每隔 15 min 记录一个数据. 图 4 给出的是 2010 年 7 月 8 日 18:00 LT 至次日 18:00 LT 时间段 Es 在 24 h 内的 f_0E_s (发生 Es 时的临界频率) 和高度变化. 可以看出 Es 最大值出现在次日 10:45 LT, Es 达到 6.95 MHz. 在 24 h 观测时段 Es 分别出现在 19:15 LT, 23:15 LT, 次日 01:45 LT, 05:00 LT 和 10:45 LT, f_0E_s 分别对应 5.55 MHz, 4.75 MHz, 4.92 MHz, 4.90 MHz, 6.95 MHz, 对应高度分别为 105.6 km, 108.8 km, 108.8 km, 106.9 km 和 117.5 km. 由图 4 可以看出, Es 出现时, 其高度均处于相对较低的水平. 由于海口激光雷达仅在夜间进行观测, 观测时间为 2010 年 7 月 8 日 21:30 LT 至次日 06:30 LT, 观测时长为 9 h. 对应于这 9 h 内 Es 出现三次, 而突发钠层仅观测到一次, 发生时间为 22:09 LT, 持续了 120 min, 晚于 Es 出现约 3 h.

为进一步分析 Es 和突发钠层的相关性, 针对突发钠层出现的夜晚选取测高仪观测数据, 两者同时都有的观测数据共 13 个 (见表 3). 表 3 中时间差是指突发钠层达到强度最大时与 Es 最小高度时的时间差, 负值表示 Es 达到最小高度时间早于突发钠层达到最大强度时间. 图 5 给出了时间差分布统计结果, 从 13 个对比数据时间差的统计结果可以看出, 突发钠层与 Es 有 84.6% 发生在 ±1 h 之内, 平均时间差为 −36.6 min, 即 Es 先达到最小高度, 然后突发钠层达到最大强度. 此外, 从表 3 中可知, 13 个对比数据中有 9 个事件是在 1 h 之内突发钠层高度与 Es 高度差在 5 km 范围内发生的. 通过以上分析可知, 低纬度突发钠层事件与 Es 事件有很大的相关性.

影响突发钠层产生机制的重要参数是突发钠层密度增长时间和衰减时间. 增长时间是突发钠层峰出现到达最大峰值时所用时间, 衰减时间是从突发钠层最大峰值到突发钠层峰消失所经历的时间. 图 6 为突发钠层密度增长时间与衰减时间统计结果, 时间间隔为 30 min. 由图 6 可知, 突发钠层密度增长时间最长为 180 min, 而衰减时间最长为 300 min, 平均增长时间为 74 min, 平均衰减时间为 131 min, 突发钠层密度增长时间小于衰减时间. 对低纬度 (23°S, 46°W)[7]、中纬i度 (31°N, 114°E)[11]、高纬度 (69°N,

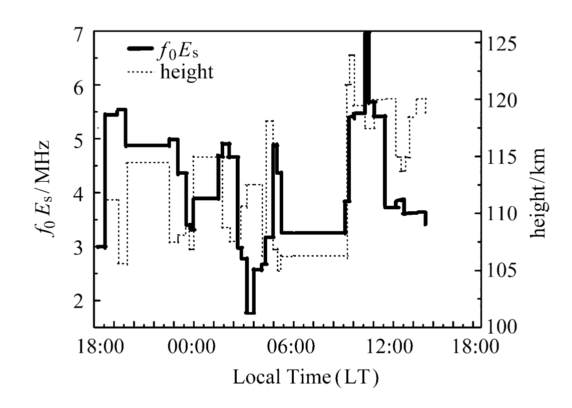


图 4 2010 年 7 月 8—9 日海南澹州测高仪观测的 Es 临界频率和高度

Fig. 4 Es layer parameters f_0E_s and height at Danzhou of Hainan on July 8—9, 2010

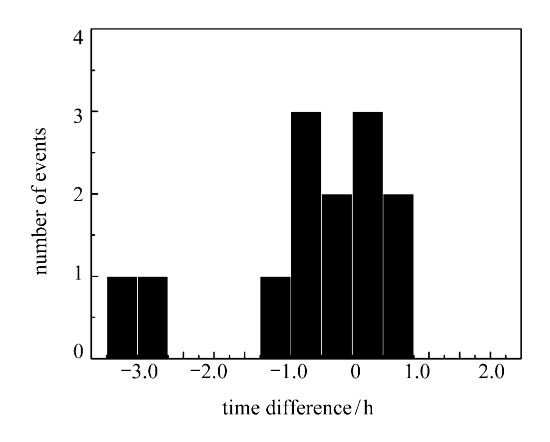


图 5 突发钠层与 Es 时间差分布. 负值表示 Es 达到最小高度时间早于突发钠层达到最大强度时间

Fig. 5 Distribution of the difference between SSL and Es. The negative value represents Es reaching its lowest height before SSL reaching its maximum

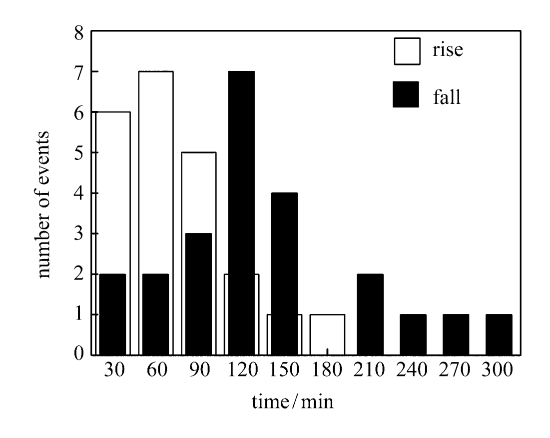


图 6 2010 年突发钠层峰上升时间和衰减时间统计

Fig. 6 Frequency distribution of the rising and falling time of the sporadic peaks

表 3 2010 年海南海口观测突发钠层和海南澹州观测 Es 的主要参数

Table 3 Main parameters of 13 pairs of SSL at Haikou (20.0°N, 110.3°E) and Es events observed at Danzhou (19.5°N, 109.1°E) in 2010

序号	日期	突发钠层			Es		
		最大值时间 (LT)	峰值高度/km	强度因子	时间差/min	最低高度/km	f_0E_s/MHz
1	May 18, 2010	22:55	95.4	8.0	5	95.0	2.77
2	Jul. 5, 2010	22:29	94.6	3.5	−164	97.5	1.77
3	Jul. 6, 2010	22:12	94.7	8.0	3	95.0	2.23
4	Jul. 7, 2010	21:04	94.7	6.5	−4	98.8	3.17
5	Jul. 8, 2010	22:33	100.9	7.0	−198	105.6	5.55
6	Jul. 14, 2010	23:01	100.7	5.0	−61	98.8	3.02
7	Sept. 18, 2010	01:04	95.6	2.0	−34	98.8	1.88
8	Sept. 19, 2010	00:23	92.3	6.0	22	96.3	2.40
9	Oct. 25, 2010	02:34	95.1	3.5	41	98.8	2.92
10	Nov. 3, 2010	00:28	101.1	6.0	32	103.8	2.65
11	Dec. 10, 2010	20:15	99.5	3.5	0	101.3	2.63
12	Dec. 26, 2010	21:24	105.6	5.0	−69	108.8	5.78
13	Dec. 29, 2010	02:02	98.2	2.5	−47	102.5	2.17

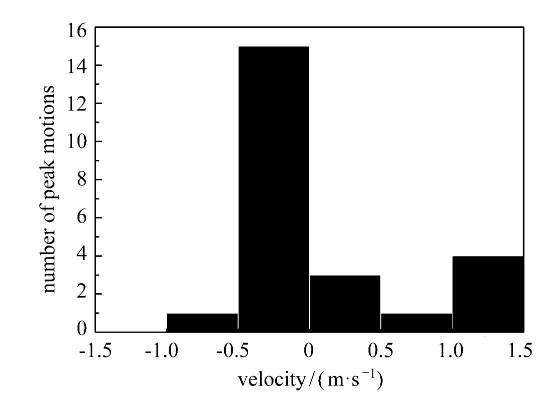


图 7 突发钠层峰值运动速度统计 (负值表示向下运动)

Fig. 7 Histogram plot for the velocities of peak motions (negative value represents the downward motion)

16°E)[14] 地区突发钠层事件的研究均证实了突发钠层增长时间小于衰减时间.

为进一步分析中国低纬度地区上空突发钠层特性, 选取完整观测到的钠层突发开始和结束事件, 共有 22 个事件. 分析突发钠层开始出现到衰减消失过程峰值径迹平均速度, 定义正值表示向上运动, 负值表示向下运动, 如果速度值在 $\pm0.14\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ 之内, 可认为突发钠层是稳定的. 如图 7 所示, 所观测到的 8 个事件是稳定的, 16 个事件向下运动, 平均速度为 $-0.24\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, 6 个事件向上运动, 平均速度为 $0.47\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$. Batista 等 [7] 在巴西低纬度地区 (23°S, 46°W) 观测到的突发钠层峰值平均径向速度为 $-0.30\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, 即突发钠层峰值向下运动. 从图 7 可以看出, 中国低纬度地区上空突发钠层峰值径迹平均速度在 $-1.0\sim1.5\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$ 范围内, 其中 72.7% 突发钠层峰值向下运动, 这与 Batista 等 [7] 在低纬度地区观测的突发钠层事件相类似.

4 结论

通过对 2010 年海口上空中高层大气钠层的观测, 研究了中国低纬度地区中高层大气突发钠层事件. 分析了中国 110°−120°E 低纬度地区中高层大气钠层突发事件的发生频率, 并与同属低纬度地区的巴西 (23°S, 46°W) 进行对比发现, 突发钠层峰值平均高度和宽度相一致. 对比海口附近测高仪观测数据, 发现突发钠层与 Es 具有很好的相关性, 相关度达到 84.6%. 通过分析突发钠层峰值的增长时间和衰减时间, 可以看出增长时间均小于衰减时间, 无论是

低纬度地区还是中纬度地区及高纬度地区均具有这一特征. 通过分析突发钠层峰值径向移动速度, 可以看出大多数突发钠层峰值向下运动, 其他低纬度地区观测也有相似结论. 对于低纬度地区中高层大气突发钠层其他特性, 例如钠层密度与纬度的关系等有待进一步分析研究.

致谢 海南澹州测高仪数据是由国家子午工程数据库提供的.

参考文献

[1] Megie G. Observations of trace metals in the upper atmosphere in laser remote chemical analysis [M]//Laser Remote Chemical Analysis. New York: John Wiley, 1988:333-408

[2] Song Juan, Cheng Xuewu, Yang Guotao, *et al.* The investigation of gravity wave activities on mesopause over Wuhan by sodium lidar [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(6):522-528. In Chinese (宋娟, 程学武, 杨国韬, 等. 武汉上空中层顶大气重力波活动的钠层荧光激光雷达观测研究 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(6):522-528)

[3] Gardner C S. Sodium resonance fluorescence lidar applications in atmospheric science and astronomy. *Proc. IEEE*, 1989, **77**:408-427

[4] She C Y, Yu J R, Latifi H, *et al.* High-spectral-resolution fluorescence light detection and ranging for mesosphere sodium temperature measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**:2095-2106

[5] Nagasawa C, Abo M. Lidar observations of a lot of sporadic sodium layers in mid-latitude [J]. *Geophy. Res. Lett.*, 1995, **22**:263-266

[6] Batista P P, Clemesha B R, Batista I S, *et al.* Characteristics of the sporadic sodium layers observed at 23°S [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**:15 349-15 358

[7] Batista P P, Clemesha B, and Simonich D M. Horizontal structures in sporadic sodium layers at 23 degrees south [J]. *Geophy. Res. Lett.*, 1991, **18**:1027-1030

[8] Collins R L, Hallinan T J, Smith R W, *et al.* Lidar observations of large high-latitude sporadic Na layer during active aurora [J]. *Geophy. Res. Lett.*, 1996, **23**:3655-3658

[9] Cox R M, Plane J M C. An ion-molecule mechanism for the formation of neutral sporadic Na layers [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:6349-6359

[10] Gardner C S, Kane T J, Hecht J H, *et al.* Formation characteristics of sporadic Na layers observed simultaneously by lidar and airglow instruments during ALOHA-90 [J]. *Geophy. Res. Lett.*, 1991, **18**:1369-1372

[11] Gong S S, Yang G T, Wang J M, *et al.* Occurrence and characteristics of sporadic sodium layer observed by lidar at a mid-latitude location [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2002, **64**:1957-1966

[12] Clemesha B R, Kirchhoff V W J H, Simonich D M, *et al.* Spaced lidar and nightlow observations of an atmospheric sodium enhancement [J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**:3480-3484

[13] Collins S C, Plane J M C, Kelley M C, *et al.* A study of the role of ion-molecule chemistry in the formation of sporadic sodium layers [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2002, **64**:845-860

[14] Zahn U Von, Gathen P Von Der, Hansen G. Forced release of sodium from upper atmospheric dust particles [J]. *Geophy. Res. Lett.*, 1987, **14**:76-79